

SIMULASI NUMERIK KURVA HUBUNGAN MOMEN DAN KURVATUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN VARIASI PENAMPANG

Heru Satiadi¹⁾, Zulfikar Djauhari²⁾, Reni Suryanita²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Email : herusatiadi@gmail.com

Abstract

Beam as one of structural elements is generally designed to exhibit ductile behavior before failure. The ductility of the whole structure is affected by the characteristic of its structural elements. The ductility of reinforced concrete (RC) beam could be measured by curvature ductility parameter. Curvature ductility is defined as the ratio between the beam curvature at ultimate state and yielding state. The ductility curvature value can be calculated based on the moment-curvature curve. One of the structural analysis softwares that can be used to produce the moment-curvature relationship curve is Response2000. This research aims to analyze the impact of varying the reinforced concrete beam characteristics to the ductility of the beam which is performed using Response2000 software to model the singly-reinforced concrete beam. By varying the concrete compressive strength, reinforcing bar (rebar) strength and diameter, reinforcement ratio, and concrete section (width and depth of concrete), 38 models of beam were generated. Based on the analysis results, it was observed that the increment of concrete compressive strength and effective depth increases curvature ductility, whereas the increment of rebar strength and reinforcing ratio reduces curvature ductility. Manual calculations on the curvature ductility showed that the output produced by Response2000 only the average difference from the manual calculations is 15,361%. This indicates that Response2000 is a reliable tool to calculate the curvature ductility of reinforced concrete beam.

Keywords: ductility, reinforced concrete, moment, curvature, Response2000

A. PENDAHULUAN

Perencanaan elemen atau komponen struktur beton pada daerah yang memiliki resiko kegempaan, haruslah memperhatikan kemampuan deformasi elemen struktur. Deformasi elemen struktur direncanakan untuk mampu melampaui batas deformasi elastiknya tanpa kehilangan kemampuan untuk memikul beban-beban yang telah direncanakan. Dengan kata lain, elemen struktur beton harus direncanakan memiliki perilaku yang duktail.

Perencanaan seismik komponen struktur beton mengharuskan bahwa penampang tersebut dalam beberapa siklus masih mampu menahan deformasi inelastik tanpa kehilangan kemampuan yang

signifikan untuk memikul beban rencana, meskipun telah terjadi pembentukan sendi plastis pada penampang kritis. Sifat penampang elemen struktur beton yang memiliki kemampuan ini dikenal sebagai penampang yang duktail, sedangkan kemampuannya disebut sebagai kapasitas daktilitas. Istilah daktilitas dapat dikenakan pada suatu bahan (*material ductility*), penampang (*section ductility*), komponen (*member ductility*), dan struktur (*structure ductility*).

Perilaku duktail suatu balok beton bertulang salah satunya dapat dilihat dari nilai daktilitas kurvatur. Momen dan kurvatur merupakan dua parameter yang

dapat digunakan untuk menentukan nilai daktilitas kurvatur. Nilai daktilitas kurvatur diperoleh dari perbandingan antara kurvatur saat kondisi *ultimate* dan kurvatur pada saat kondisi leleh. Penelitian ini sudah dimulai sejak tahun 1970-an, dengan menganalisis beberapa parameter yang mempengaruhinya, yaitu dimensi penampang, mutu beton, mutu baja tulangan longitudinal, dan rasio tulangan longitudinal. Metode analisis ini membutuhkan langkah perhitungan yang cukup rumit dan panjang karena banyaknya parameter yang saling mempengaruhi hasil perhitungan.

Perkembangan material penyusun struktur maupun bentuk dimensi penampang struktur dari tahun ke tahun terus mengalami perkembangan. Penggunaan beton bertulang dengan berbagai mutu disesuaikan dengan kebutuhan perencanaan yang efektif dan memenuhi syarat kemampulayanan yang dibutuhkan. Sehingga dibutuhkan sebuah metode perhitungan yang dapat menganalisis dengan cepat dari berbagai variasi parameter yang mempengaruhinya. Saat ini untuk membantu menghitung daktilitas penampang sejak dua dasarwarsa yang lalu telah dikembangkan suatu program perangkat lunak berlisensi bebas (*open sources*) yang bernama *Response 2000*. Program *Response2000* merupakan program yang dikembangkan oleh Evan Bentz yang dengan mudah dapat digunakan untuk menganalisis respons balok beton bertulang berupa momen lentur, gaya geser, dan kurvatur. Asumsi yang digunakan dalam program ini diantaranya adalah *plane section remain plane after bending* dan tidak adanya loncatan tegangan sepanjang penampang.

Beberapa penelitian terdahulu yang mengangkat topik mengenai kapasitas struktur balok beton bertulang, telah menggunakan *software Response2000* sebagai alat bantu analisis. *Software Response2000* telah digunakan untuk menganalisis balok beton bertulang, seperti nilai kapasitas lentur (Amir, 2010),

daktilitas peralihan (Dita, 2010), dan momen inersia (Ritinov & Assidiqy, 2008). Namun penulis belum menemukan publikasi penelitian sejenis yang menggunakan program ini untuk menganalisis daktilitas kurvatur pada balok beton bertulang.

Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian dalam rangka tugas akhir ini akan difokuskan pada analisis kurva hubungan momen dan kurvatur menggunakan *software Response2000*. Penelitian ini membatasi kajian pada penampang yang bersifat lentur saja, yakni penampang balok beton bertulang yang memiliki mutu material normal dan dilakukan variasi terhadap karakteristiknya untuk memperoleh pola tertentu dari kurva hubungan momen dan kurvatur, tingkat kekuatan, serta daktilitas balok beton bertulang.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka beberapa permasalahan berikut dapat dirumuskan.

1. Untuk mengkaji pengaruh karakteristik balok beton bertulang terhadap hubungan momen-kurvatur dan daktilitas kurvatur hasil analisis *software Response2000* dengan pemberian variasi terhadap mutu beton, mutu baja tulangan longitudinal, rasio tulangan longitudinal, dan dimensi penampang.
2. Untuk mengkaji perbandingan nilai momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur dari kurva hubungan momen dan kurvatur antara hasil perhitungan menggunakan *software Response2000* dan hasil perhitungan manual.

A.1. Daktilitas

Daktilitas merupakan kemampuan struktur atau komponen struktur untuk menahan respons inelastik yang dominan dalam memikul beban agar tidak runtuh. Secara matematis, nilai daktilitas (μ) struktur didefinisikan sebagai perbandingan antara suatu parameter deformasi rencana maksimum struktur (Δ_u) dengan deformasi pada saat terjadinya leleh pertama pada

struktur yang ditinjau (Δ_y), seperti yang diberikan dalam persamaan berikut.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

Daktilitas menurut Paulay & Priestly (1992), antara lain adalah sebagai berikut.

a. Daktilitas regangan (*strain ductility*, μ_ε)

$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} \quad (2)$$

dengan μ_ε adalah daktilitas regangan, ε_u adalah regangan maksimum, dan ε_y adalah regangan saat leleh.

b. Daktilitas kelengkungan (*curvature ductility*, μ_ϕ)

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (3)$$

dengan μ_ϕ adalah daktilitas kelengkungan, ϕ_u adalah sudut kelengkungan maksimum (rad/mm), dan ϕ_y adalah sudut kelengkungan leleh (rad/mm).

c. Daktilitas rotasi (*rotational ductility*, μ_θ)

$$\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad (4)$$

dengan μ_θ adalah daktilitas rotasi, θ_u adalah putaran sudut maksimum sendi plastis (rad), dan θ_y adalah putaran sudut leleh (rad).

d. Daktilitas perpindahan (*displacement ductility*)

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (5)$$

dengan μ_δ adalah daktilitas perpindahan, δ_u adalah perpindahan (deformasi) maksimum (mm), dan δ_y adalah perpindahan (deformasi) struktur saat leleh (mm).

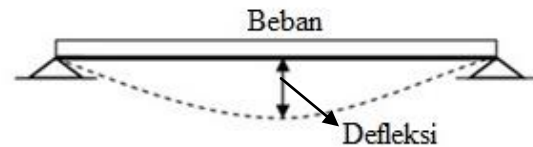
A.2. Hubungan Momen dan Kurvatur

Pembebanan pada struktur balok beton bertulang yang melebihi beban *ultimate* dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1. Perbedaan perilaku getas dan *ductile* (liat) dapat dilihat pada gambar ini.

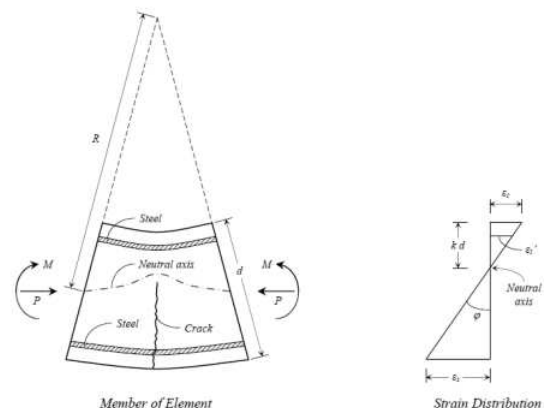
Momen ujung dan gaya aksial yang terjadi pada balok beton bertulang, mengakibatkan struktur yang awalnya lurus

menjadi lengkung seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.

Jari-jari kurvatur (R), tinggi sumbu netral (kd), regangan beton pada serat tekan terluar (ε_c), dan tegangan-regangan baja (ε_s), akan berubah-ubah sepanjang bentang karena adanya retak beton yang juga memberikan tegangan.



Gambar 1 Perilaku Defleksi akibat Pembebanan
(Park & Paulay, 1975)



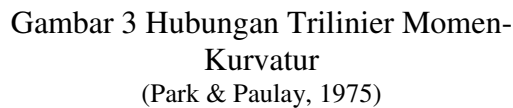
Gambar 2 Deformasi Elemen Struktur akibat Pembebanan Lentur
(Park & Paulay, 1975)

Berdasarkan Gambar 2, dengan mengasumsikan material homogen dan berperilaku elastik linier, rotasi antara kedua ujung elemen adalah:

$$\frac{1}{R} = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} \quad (6)$$

Kurvatur selalu berubah-ubah sepanjang batang karena adanya fluktuasi ketinggian sumbu netral dan regangan antara setiap retak. Jika pada bagian tertentu dari panjang elemen memiliki retak, maka nilai kurvatur diperoleh dari Persamaan 7, dengan ε_c dan ε_s sebagai regangan pada bagian retak.

$$\phi = \frac{\varepsilon_c}{kd} = \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \quad (7)$$


$$EI = MR = \frac{M}{\varphi} \quad (8)$$
$$M_{cr} = \frac{f_r I}{y_{bottom}} \quad (9)$$

$$\varphi_{cr} = \frac{f_r}{E_c y_{bottom}} \quad (10)$$

$$M_v = A_s f_v j d \quad (11)$$

$$M_u = 0,85 f_c' ab \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (13)$$

$$f_c = f'_c \left\{ \frac{2\varepsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0,002} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

b. Untuk $\varepsilon_c \geq 0,002$ (*descending branch*)

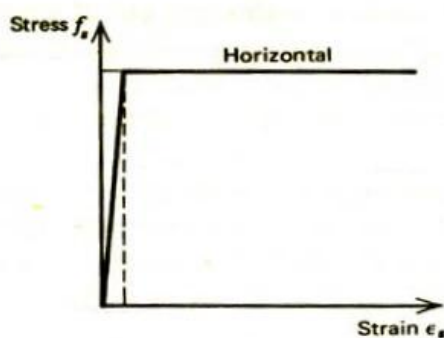
$$f_c = f'_c \{1 - Z_0 (\varepsilon_c - 0,002)\} \quad (16)$$

dengan,

$$Z_0 = \frac{0,5}{\varepsilon_{50u} - 0,002} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002 f'_c}{f'_c - 1000} \quad (18)$$

Model Elasto-Plastis merupakan salah satu model tegangan-regangan baja. Model ini menyederhanakan kurva plastis menjadi garis linier yang sama besarnya dengan tegangan leleh.



Gambar 5 Kurva Hubungan Tegangan Regangan Baja Model Elasto-Plastis (Park & Paulay, 1975)

A.5. Software Response2000

Response2000 merupakan program analisis penampang non-linier untuk analisis elemen beton bertulang akibat gaya geser dengan berdasarkan prinsip *Modified Compression Field Theory*. Program ini dikembangkan oleh Evant Bentz dari tahun 1996-1999. Program ini juga dapat memprediksi respons penampang beton bertulang terhadap beban-beban lentur, axial, dan geser. Asumsi yang digunakan dalam *software Response2000* adalah elemen struktur tetap rata/tidak melendut setelah menerima beban dan tidak adanya loncatan tegangan sepanjang penampang.

B. METODOLOGI PENELITIAN

Pemodelan balok beton bertulang dilakukan menggunakan *software Response2000* dengan pemberian variasi

pada mutu beton, mutu baja tulangan longitudinal, rasio tulangan longitudinal, dan dimensi penampang. Selanjutnya kurva hubungan momen dan kurvatur dari tiap variasi dianalisis dan diverifikasi.

B.1. Data Prototipe

Prototipe dalam analisis ini merupakan balok beton bertulangan tunggal tanpa tulangan sengkang. Prototipe dibuat dengan empat variasi geometri penampang, yaitu ukuran 300×300 mm, 300×400 mm, 300×500 mm, dan 300×600 mm. Data variasi *properties* struktur untuk seluruh model ditabulasikan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Variasi Data Karakteristik

No	Dimensi		Mutu Beton f'_c (MPa)	Mutu Baja, f_y (MPa)	Diameter Tulangan, D (mm)	Rasio Tulangan, ρ
	b (mm)	h (mm)				
1.	300	300	26	420	22	0,0153
2.	300	300	28	420	22	0,0153
3.	300	300	32	420	22	0,0153
4.	300	300	34	420	22	0,0153
5.	300	300	36	420	22	0,0153
6.	300	300	40	420	22	0,0153
7.	300	300	28	300	22	0,0153
8.	300	300	28	320	22	0,0153
9.	300	300	28	350	22	0,0153
10.	300	300	28	370	22	0,0153
11.	300	300	28	400	22	0,0153
12.	300	300	28	420	22	0,0153
13.	300	300	28	420	17	0,0090
14.	300	300	28	420	18	0,0101
15.	300	300	28	420	19	0,0113
16.	300	300	28	420	20	0,0126
17.	300	300	28	420	21	0,0139
18.	300	600	28	420	22	0,0153
19.	300	400	28	400	22	0,0109
20.	300	500	28	400	22	0,0085
21.	300	600	26	420	22	0,0069
22.	300	600	28	420	22	0,0069
23.	300	600	32	420	22	0,0069
24.	300	600	34	420	22	0,0069
25.	300	600	36	420	22	0,0069
26.	300	600	40	420	22	0,0069
27.	300	600	28	300	22	0,0069
28.	300	600	28	320	22	0,0069
29.	300	600	28	350	22	0,0069
30.	300	600	28	370	22	0,0069
31.	300	600	28	400	22	0,0069
32.	300	600	28	420	22	0,0069
33.	300	600	28	420	17	0,0041
34.	300	600	28	420	18	0,0046
35.	300	600	28	420	19	0,0052
36.	300	600	28	420	20	0,0057
37.	300	600	28	420	21	0,0063
38.	300	600	28	420	22	0,0069

Untuk variasi mutu beton, diambil dalam *range* 26-40 MPa dan variasi mutu baja tulangan longitudinal diambil dalam *range* 300-420 MPa, keduanya tergolong kedalam mutu normal. Sedangkan untuk

variasi rasio tulangan longitudinal, diberikan variasi pada diameter tulangan, diambil ukuran 17-22 mm.

B.2. Pemodelan menggunakan *Software Response2000*

Seluruh data *properties* dari tiap pemodelan di-*input*. Tahapan pemodelan secara berurutan dimulai dengan *input* data mutu beton dan mutu baja tulangan, data geometri penampang, data diameter dan jumlah tulangan longitudinal, dan yang terakhir data selimut beton.

Dari kurva hubungan momen dan kurvatur hasil analisis *Response2000* selanjutnya dapat dihitung nilai daktilitas kurvatur dengan membandingkan kurvatur kondisi *ultimate* dan kurvatur kondisi leleh.

B.3. Perhitungan Momen-Kurvatur dan Daktilitas Kurvatur secara Manual

Nilai momen dan kurvatur dihitung mulai dari kondisi retak, leleh, dan *ultimate* untuk masing-masing prototipe. Dari nilai momen dan kurvatur yang diperoleh, selanjutnya nilai daktilitas kurvatur dapat dihitung.

Balok yang dianalisis dengan karakteristik sebagai berikut.

1. Lebar balok (b).
2. Tinggi balok (h).
3. Kuat tekan beton (f'_c).
4. Kuat leleh baja (f_y).
5. Jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik / tinggi efektif balok (d).
6. Regangan beton saat *ultimate* (ϵ_u).
7. Elastisitas baja (E_s).
8. Selimut beton.
9. Tulangan longitudinal tarik.
 - a. Luas tulangan.
 - b. Rasio tulangan.
 - c. Rasio tulangan minimum.
 - d. Rasio tulangan seimbang.
 - e. Rasio tulangan maksimum.

Dari data karakteristik tersebut, selanjutnya dihitung nilai momen dan kurvatur untuk kondisi retak menggunakan Persamaan 13 dan Persamaan 14, kondisi

leleh menggunakan Persamaan 15 dan Persamaan 16, serta kondisi *ultimate* menggunakan Persamaan 17 dan Persamaan 18. Selanjutnya, nilai daktilitas kurvatur dihitung dengan Persamaan 3.

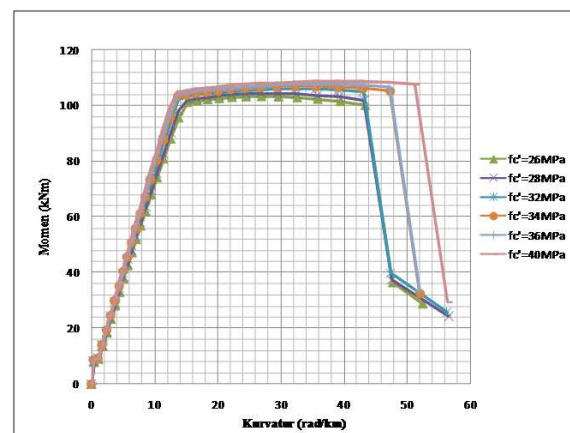
C. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

C.1. Analisis Kurva Hubungan Momen dan Kurvatur

Kurva momen-kurvatur hasil *software Response2000*, dianalisis pengaruhnya terhadap variasi mutu beton, mutu baja tulangan longitudinal, rasio tulangan longitudinal, dan dimensi penampang.

C.1.1. Pengaruh Mutu Beton

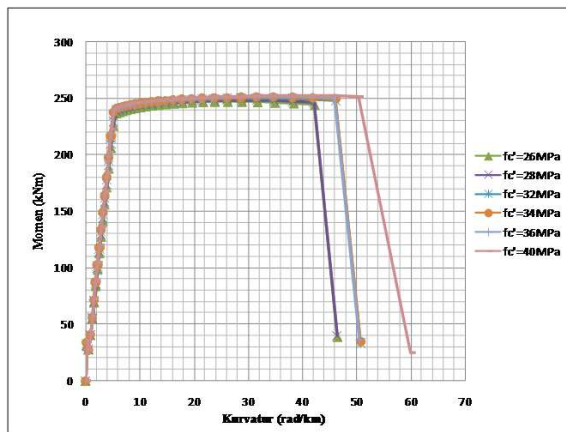
Pengaruh mutu beton terhadap momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur dianalisis berdasarkan kurva yang diperoleh.



Gambar 6 Kurva Momen-Kurvatur untuk Dimensi 300×300 mm dengan Variasi Mutu Beton

Tabel 2 Hasil Analisis *Response2000* untuk Dimensi 300×300 mm dengan Variasi Mutu Beton

f'_c (MPa)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ
26	7,845	0,425	101,041	15,201	103,102	26,93	1,772
28	8,022	0,406	101,896	15,161	104,206	29,545	1,949
32	8,359	0,375	102,382	13,722	106,071	32,356	2,358
34	8,52	0,362	103,384	13,696	106,82	32,295	2,358
36	8,676	0,349	103,923	13,672	107,507	35,463	2,594
40	8,977	0,328	104,811	13,501	108,67	38,519	2,853



Gambar 7 Kurva Momen-Kurvatur untuk Dimensi 300×600 mm dengan Variasi Mutu Beton

Tabel 3 Hasil Analisis *Response2000* untuk Dimensi 300×600 mm dengan Variasi Mutu Beton

f_c' (MPa)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ
26	30,846	0,212	236,653	5,71	246,781	26,239	4,595
28	31,571	0,203	237,671	5,696	247,951	28,788	5,054
32	32,952	0,188	239,466	5,67	249,768	31,527	5,560
34	33,611	0,181	240,29	5,66	250,517	34,613	6,115
36	34,252	0,175	239,592	5,136	251,176	34,553	6,728
40	35,483	0,164	241,341	5,12	252,359	37,893	7,401

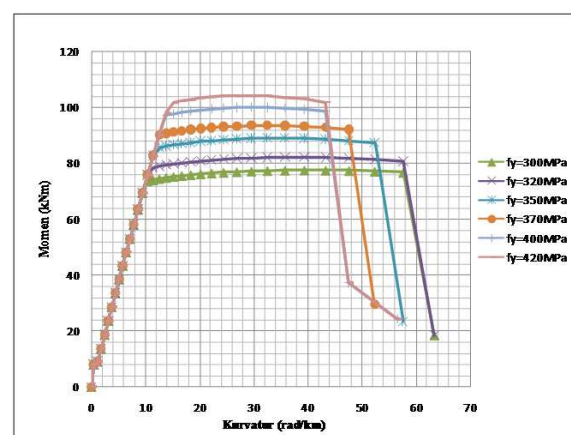
Gambar 6 dan Gambar 7 memperlihatkan peningkatan mutu beton membuat garis kurva setelah mencapai titik leleh hingga mencapai kondisi *ultimate* dan runtuh menjadi semakin panjang. Secara nominal, pada Tabel 2 dan Tabel 3 memperlihatkan bahwa Peningkatan mutu beton dari 26 MPa sampai 40 MPa menyebabkan perubahan pada nilai momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur. Kapasitas M_{cr} mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 1,132 kNm dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 4,637 kNm. Kapasitas M_y mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 3,77 kNm dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 4,688 kNm. Kapasitas M_u mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 5,568 kNm dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 5,578 kNm. Sementara nilai ϕ_{cr} mengalami penurunan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 0,097 rad/km dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 0,048 rad/km. Nilai ϕ_y mengalami penurunan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 1,7 rad/km dan untuk dimensi

300×600 mm sebesar 0,59 rad/km. Namun pada nilai ϕ_u mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 11,589 rad/km dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 11,654 rad/km. Secara mekanik, semakin meningkat mutu beton, maka semakin meningkat daktilitas kurvatur. Peningkatan daktilitas kurvatur yang terjadi untuk dimensi 300×300 mm sebesar 1,081 dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 2,806.

Peningkatan daktilitas kurvatur disebabkan karena nilai faktor garis netral (k) dan tinggi blok tegangan tekan persegi ekuivalen (a) menurun seiring dengan meningkatnya mutu beton. Sehingga lebih lanjut menyebabkan ϕ_y menurun, sedangkan ϕ_u meningkat. Bertambahnya regangan beton pada serat ekstrem saat kondisi *ultimate* juga meningkatkan daktilitas kurvatur karena nilai ϕ_u meningkat. Dapat disimpulkan bahwa, semakin meningkatnya mutu beton dapat meningkatkan nilai daktilitas dari suatu balok beton bertulang.

C.1.2. Pengaruh Mutu Baja Tulangan Longitudinal

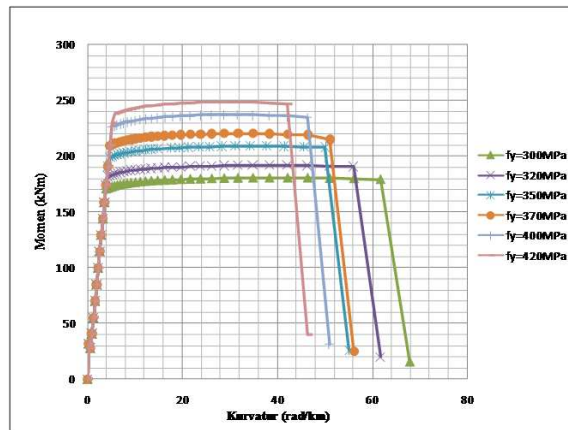
Pengaruh mutu baja tulangan longitudinal terhadap momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur dianalisis berdasarkan kurva yang diperoleh.



Gambar 8 Kurva Momen-Kurvatur untuk Dimensi 300×300 mm dengan Variasi Mutu Baja Tulangan Longitudinal

Tabel 4 Hasil Analisis *Response2000* untuk Dimensi 300×300 mm dengan Variasi Mutu Baja Tulangan Longitudinal

f_y (MPa)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ
300	8,022	0,406	73,618	10,356	77,511	39,325	3,797
320	8,022	0,406	78,496	11,391	82,133	35,75	3,138
350	8,022	0,406	85,621	12,53	88,935	32,5	2,594
370	8,022	0,406	90,007	12,53	93,394	32,5	2,594
400	8,022	0,406	97,052	13,783	99,952	29,545	2,144
420	8,022	0,406	101,896	15,161	104,206	29,545	1,949



Gambar 9 Kurva Momen-Kurvatur untuk Dimensi 300×600 mm dengan Variasi Mutu Baja Tulangan Longitudinal

Tabel 5 Hasil Analisis *Response2000* untuk Dimensi 300×600 mm dengan Variasi Mutu Baja Tulangan Longitudinal

f_y (MPa)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ
300	31,571	0,203	170,346	3,89	180,142	42,148	10,835
320	31,571	0,203	181,7	4,279	191,575	38,317	8,955
350	31,571	0,203	198,563	4,707	208,71	34,258	7,278
370	31,571	0,203	208,842	4,707	219,982	31,667	6,728
400	31,571	0,203	226,066	5,178	236,784	28,788	5,560
420	31,571	0,203	237,671	5,696	247,951	28,788	5,054

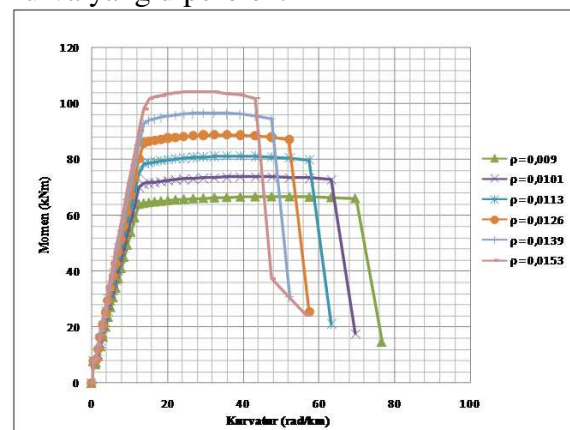
Gambar 8 dan Gambar 9 memperlihatkan peningkatan mutu baja tulangan longitudinal membuat garis kurva setelah mencapai titik leleh hingga mencapai kondisi *ultimate* dan runtuh menjadi semakin pendek. Peningkatan mutu baja diiringi dengan semakin tingginya titik leleh yang mampu dicapai. Secara nominal, Tabel 4 dan Tabel 5 memperlihatkan bahwa peningkatan mutu baja tulangan longitudinal dari 300 MPa sampai 420 MPa menyebabkan perubahan pada nilai momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur. Namun untuk kapasitas M_{cr} nilai ϕ_{cr} tidak mengalami perubahan. Kapasitas M_y mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 28,278 kNm dan

untuk dimensi 300×600 mm sebesar 67,325 kNm. Kapasitas M_u mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 26,695 kNm dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 67,809 kNm. Sementara nilai ϕ_y mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 4,805 rad/km dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 1,806 rad/km. Namun pada nilai ϕ_u mengalami penurunan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 9,78 rad/km dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 13,36 rad/km. Secara mekanik, semakin meningkat mutu baja tulangan maka semakin menurun daktilitas kurvatur. Penurunan daktilitas kurvatur yang terjadi untuk dimensi 300×300 mm sebesar 1,848 dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 5,781.

Bertambahnya mutu baja tulangan longitudinal akan menurunkan daktilitas kurvatur karena nilai f_y/E_s dan a meningkat. Dengan demikian, nilai ϕ_y meningkat, sedangkan ϕ_u menurun. Dapat disimpulkan bahwa, peningkatan mutu baja tulangan longitudinal dapat menurunkan kapasitas daktilitas dari suatu balok beton bertulang.

C.1.3. Pengaruh Rasio Tulangan Longitudinal

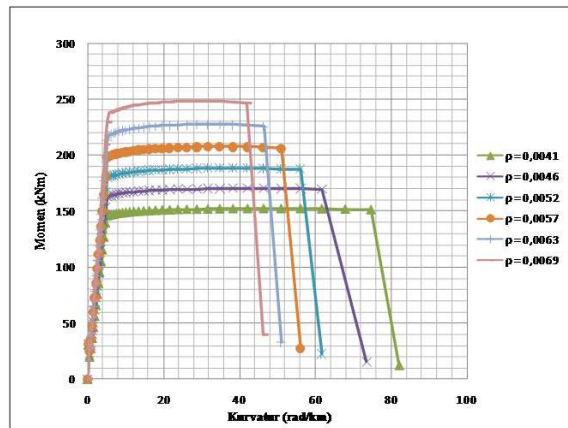
Pengaruh rasio tulangan longitudinal terhadap momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur dianalisis berdasarkan kurva yang diperoleh.



Gambar 10 Kurva Momen-Kurvatur untuk Dimensi 300×300 mm dengan Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

Tabel 6 Hasil Analisis *Response2000* untuk Dimensi 300×300 mm dengan Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

ρ	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ
0,009	7,766	0,406	63,871	12,53	66,567	47,583	3,798
0,0101	7,815	0,406	71,164	13,783	73,729	43,258	3,139
0,0113	7,865	0,406	78,392	13,783	81,116	39,325	2,853
0,0126	7,916	0,406	85,848	13,783	88,678	35,75	2,594
0,0139	7,969	0,406	92,736	13,783	96,385	29,545	2,144
0,0153	8,022	0,406	101,896	15,161	104,206	29,545	1,949



Gambar 11 Kurva Momen-Kurvatur untuk Dimensi 300×600 mm dengan Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

Tabel 7 Hasil Analisis *Response2000* untuk Dimensi 300×600 mm dengan Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

ρ	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ
0,0041	30,66	0,203	146,032	5,178	152,362	46,363	8,954
0,0046	30,828	0,203	162,689	5,178	169,93	42,148	8,140
0,0052	31,003	0,203	180,104	5,178	188,254	34,833	6,727
0,0057	31,186	0,203	197,933	5,178	207,491	34,833	6,727
0,0063	31,375	0,203	217,988	5,696	227,331	31,667	5,560
0,0069	31,571	0,203	237,671	5,696	247,951	28,788	5,054

Gambar 10 dan Gambar 11 memperlihatkan peningkatan rasio tulangan longitudinal membuat garis kurva setelah mencapai titik leleh hingga mencapai kondisi *ultimate* dan runtuh menjadi semakin pendek. Sama halnya dengan peningkatan mutu baja tulangan, peningkatan rasio tulangan longitudinal juga diiringi dengan semakin tingginya titik leleh yang mampu dicapai. Secara nominal, Tabel 6 dan Tabel 7 memperlihatkan bahwa peningkatan rasio tulangan longitudinal akibat peningkatan diameter tulangan dari 17 mm sampai 22 mm menyebabkan perubahan pada nilai momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur. Namun untuk nilai ϕ_{cr} tidak mengalami perubahan. Kapasitas M_{cr}

mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 0,256 kNm dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 0,911 kNm. Kapasitas M_y mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 38,025 kNm dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 91,639 kNm. Kapasitas M_u mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 37,639 kNm dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 95,589 kNm. Sementara nilai ϕ_y mengalami peningkatan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 2,631 rad/km dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 0,518 rad/km. Namun pada nilai ϕ_u mengalami penurunan untuk dimensi 300×300 mm sebesar 18,038 rad/km dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 17,575 rad/km. Secara mekanik, semakin meningkat diameter tulangan maka semakin menurun daktilitas kurvatur. Penurunan daktilitas kurvatur yang terjadi untuk dimensi 300×300 mm sebesar 1,849 dan untuk dimensi 300×600 mm sebesar 3,9.

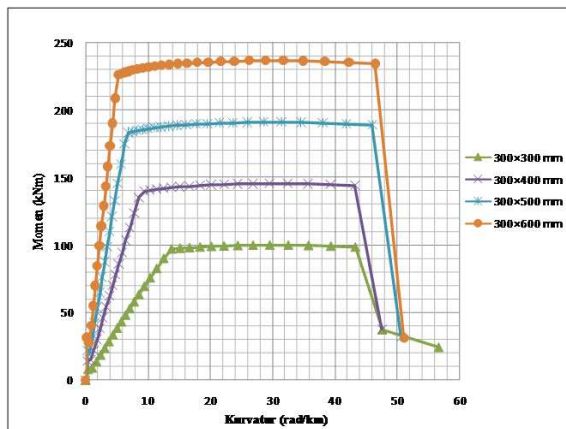
Bertambahnya rasio tulangan longitudinal akibat penambahan diameter tulangan akan menurunkan daktilitas kurvatur karena nilai k dan a meningkat. Dengan demikian, ϕ_y meningkat, sedangkan ϕ_u mengalami penurunan. Dapat disimpulkan bahwa, peningkatan rasio tulangan longitudinal dapat menurunkan nilai daktilitas dari suatu balok beton bertulang.

C.1.4. Pengaruh Dimensi Penampang

Pengaruh ukuran dimensi penampang terhadap momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur dianalisis berdasarkan kurva yang diperoleh.

Gambar 12 memperlihatkan pengaruh dimensi dan dalam hal ini dimodelkan variasi pada tinggi penampang, sehingga yang menjadi parameter berpengaruh akibat perubahan tinggi penampang adalah tinggi efektif penampang (d). Bentuk garis dari titik retak hingga mencapai titik leleh cenderung semakin tegak atau tidak condong seiring dengan penambahan tinggi penampang balok. Peningkatan tinggi penampang ini

membuat garis kurva setelah mencapai titik leleh hingga mencapai kondisi *ultimate* dan runtuh menjadi semakin panjang. Sama halnya dengan peningkatan mutu baja tulangan dan peningkatan rasio tulangan longitudinal, peningkatan tinggi efektif pada penampang juga diiringi dengan semakin tingginya titik leleh yang mampu dicapai.



Gambar 12 Kurva Momen-Kurvatur untuk Variasi Dimensi Penampang

Tabel 8 Hasil Analisis *Response2000* untuk Variasi Dimensi Penampang

b (mm)	h (mm)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ
300	300	8,022	0,406	97,052	13,783	99,952	29,545	2,144
300	400	14,228	0,305	140,109	9,398	145,576	29,494	3,138
300	500	22,082	0,244	183,114	6,835	190,984	31,405	4,595
300	600	31,571	0,203	226,066	5,178	236,784	28,788	5,560

Secara nominal, Tabel 8 memperlihatkan bahwa peningkatan tinggi efektif penampang akibat peningkatan

dimensi penampang dari 300 mm sampai 600 mm menyebabkan perubahan pada nilai momen, kurvatur, dan daktilitas kurvatur. Namun untuk nilai ϕ_u memiliki nilai yang hampir sama. Kapasitas M_{cr} mengalami peningkatan sebesar 23,549 kNm, kapasitas M_y mengalami peningkatan sebesar 129,014 kNm dan kapasitas M_u mengalami peningkatan sebesar 136,832 kNm. Sementara nilai ϕ_{cr} mengalami penurunan sebesar 0,203 dan ϕ_y mengalami penurunan sebesar 8,605. Secara mekanik, semakin meningkat tinggi efektif penampang, maka semakin meningkat daktilitas kurvatur. Peningkatan daktilitas kurvatur adalah sebesar 3,416. Peningkatan tinggi efektif 100% menyebabkan peningkatan daktilitas kurvatur sebesar 159%.

Peningkatan nilai daktilitas kurvatur disebabkan nilai ϕ_y yang menurun cukup signifikan sementara ϕ_u hampir tidak berubah. Dapat disimpulkan bahwa, pengaruh dimensi penampang akibat peningkatan tinggi efektif penampang dapat meningkatkan nilai daktilitas dari suatu balok beton bertulang.

C.2. Perhitungan Momen dan Kurvatur secara Manual

Untuk keperluan verifikasi hasil analisis menggunakan *software Response2000*, dilakukan perhitungan secara manual.

Tabel 9 Hasil Analisis Perhitungan Manual dengan Variasi Mutu Beton

Dimensi 300x300 mm									Dimensi 300x600 mm								
f'_c (MPa)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ		f'_c (MPa)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ	
26	16,751	0,932	103,631	13,899	101,962	23,532	1,693		26	64,516	0,457	237,793	5,365	245,652	23,532	4,386	
28	17,278	0,930	103,849	13,775	103,198	25,342	1,840		28	66,627	0,456	238,179	5,332	246,888	25,342	4,753	
32	18,278	0,926	104,237	13,559	105,206	27,989	2,064		32	70,635	0,455	238,862	5,275	248,896	27,989	5,306	
34	18,754	0,925	104,411	13,464	106,033	29,221	2,170		34	72,544	0,454	239,168	5,250	249,723	29,221	5,566	
36	19,217	0,923	104,574	13,376	106,768	30,392	2,272		36	74,398	0,454	239,453	5,226	250,458	30,392	5,815	
40	20,104	0,921	104,871	13,220	108,017	32,552	2,462		40	77,957	0,453	239,972	5,184	251,707	32,552	6,279	

Tabel 10 Hasil Analisis Perhitungan Manual dengan Variasi Mutu Baja Tulangan Longitudinal

Dimensi 300x300 mm									Dimensi 300x600 mm								
f_y (MPa)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ		f_y (MPa)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ	
300	17,278	0,930	74,178	9,839	76,991	35,479	3,606		300	66,627	0,456	170,128	3,809	179,627	35,479	9,315	
320	17,278	0,930	79,123	10,495	81,541	33,261	3,169		320	66,627	0,456	181,470	4,063	191,019	33,261	8,187	
350	17,278	0,930	86,541	11,479	88,229	30,410	2,649		350	66,627	0,456	198,482	4,444	207,971	30,410	6,844	
370	17,278	0,930	91,486	12,135	92,597	28,767	2,371		370	66,627	0,456	209,824	4,697	219,181	28,767	6,124	
400	17,278	0,930	98,904	13,119	99,012	26,609	2,028		400	66,627	0,456	226,837	5,078	235,860	26,609	5,240	
420	17,278	0,930	103,849	13,775	103,198	25,342	1,840		420	66,627	0,456	238,179	5,332	246,888	25,342	4,753	

Tabel 11 Hasil Analisis Perhitungan Manual dengan Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

Dimensi 300x300 mm								Dimensi 300x600 mm							
ρ	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ	ρ	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ
0,0090	16,349	0,911	64,369	12,194	66,200	42,441	3,480	0,0041	63,669	0,449	145,828	4,922	151,998	42,441	8,624
0,0101	16,522	0,914	71,614	12,495	73,279	37,857	3,030	0,0046	64,207	0,451	162,657	5,001	169,468	37,857	7,570
0,0113	16,702	0,918	79,192	12,804	80,553	33,977	2,654	0,0052	64,773	0,452	180,317	5,082	187,727	33,977	6,686
0,0126	16,888	0,922	87,094	13,119	87,987	30,664	2,337	0,0057	65,365	0,453	198,799	5,164	206,740	30,664	5,938
0,0139	17,080	0,926	95,315	13,443	95,548	27,813	2,069	0,0063	65,983	0,454	218,089	5,248	226,472	27,813	5,300
0,0153	17,278	0,930	103,849	13,775	103,198	25,342	1,840	0,0069	66,627	0,456	238,179	5,332	246,888	25,342	4,753

Tabel 12 Hasil Analisis Perhitungan Manual dengan Variasi Dimensi Penampang

b (mm)	h (mm)	M_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (rad/km)	M_y (kNm)	ϕ_y (rad/km)	M_u (kNm)	ϕ_u (rad/km)	μ_ϕ
300	300	17,278	0,930	98,904	13,119	99,012	26,609	2,028
300	400	30,408	0,692	141,156	8,683	144,628	26,609	3,064
300	500	46,866	0,550	183,846	6,429	190,244	26,609	4,139
300	600	66,627	0,456	226,837	5,078	235,860	26,609	5,240

C.3. Verifikasi Hasil Perhitungan

Verifikasi hasil analisis nilai momen dan kurvatur untuk kondisi retak, leleh, dan *ultimate* serta daktilitas kurvatur menggunakan *software Response2000*

dilakukan untuk melihat apakah hasil dari analisis *software* tersebut telah mendekati dengan hasil perhitungan secara manual. Selisih hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk persentase.

Tabel 13 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur Retak untuk Variasi Mutu Beton

Dimensi 300x300 mm							Dimensi 300x600 mm						
Mutu Beton, f_c ' (MPa)	Momen Retak, M_{cr} (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Retak, ϕ_{cr} (rad/km)		Selisih (%)	Mutu Beton, f_c ' (MPa)	Momen Retak, M_{cr} (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Retak, ϕ_{cr} (rad/km)		Selisih (%)
	Response2000	Manual		Response2000	Manual			Response2000	Manual		Response2000	Manual	
26	7,845	16,751	53,166	0,425	0,932	54,389	26	30,846	64,516	52,188	0,212	0,457	53,567
28	8,022	17,278	53,571	0,406	0,930	56,330	28	31,571	66,627	52,616	0,203	0,456	55,470
32	8,359	18,278	54,267	0,375	0,926	59,507	32	32,952	70,635	53,349	0,188	0,455	58,653
34	8,520	18,754	54,570	0,362	0,925	60,845	34	33,611	72,544	53,668	0,181	0,454	60,148
36	8,676	19,217	54,851	0,349	0,923	62,192	36	34,252	74,398	53,961	0,175	0,454	61,429
40	8,977	20,104	55,347	0,328	0,921	64,369	40	35,483	77,957	54,484	0,164	0,453	63,787

Tabel 14 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur Retak untuk Variasi Mutu Baja Tulangan Longitudinal

Dimensi 300×300 mm						Dimensi 300×600 mm							
Mutu Baja, f_y (MPa)	Momen Retak, M_{cr} (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Retak, φ_{cr} (rad/km)		Selisih (%)	Mutu Baja, f_y (MPa)	Momen Retak, M_{cr} (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Retak, φ_{cr} (rad/km)		Selisih (%)
	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual			<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
300	8,022	17,278	53,571	0,406	0,93	56,330	300	31,571	66,627	52,616	0,203	0,456	55,47
320	8,022	17,278	53,571	0,406	0,93	56,330	320	31,571	66,627	52,616	0,203	0,456	55,47
350	8,022	17,278	53,571	0,406	0,93	56,330	350	31,571	66,627	52,616	0,203	0,456	55,47
370	8,022	17,278	53,571	0,406	0,93	56,330	370	31,571	66,627	52,616	0,203	0,456	55,47
400	8,022	17,278	53,571	0,406	0,93	56,330	400	31,571	66,627	52,616	0,203	0,456	55,47
420	8,022	17,278	53,571	0,406	0,93	56,330	420	31,571	66,627	52,616	0,203	0,456	55,47

Tabel 15 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur Retak untuk Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

Dimensi 300×300 mm						Dimensi 300×600 mm							
Rasio Tulangan, ρ	Momen Retak, M_{cr} (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Retak, φ_{cr} (rad/km)		Selisih (%)	Rasio Tulangan, ρ	Momen Retak, M_{cr} (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Retak, φ_{cr} (rad/km)		Selisih (%)
	Response2000	Manual		Response2000	Manual			Response2000	Manual		Response2000	Manual	
0.0090	7.766	16.349	52.498	0.406	0.911	55.414	0.0041	30.660	63.669	51.845	0.203	0.449	54.838
0.0101	7.815	16.522	52.700	0.406	0.914	55.586	0.0046	30.828	64.207	51.987	0.203	0.451	54.954
0.0113	7.865	16.702	52.910	0.406	0.918	55.764	0.0052	31.003	64.773	52.136	0.203	0.452	55.075
0.0126	7.916	16.888	53.128	0.406	0.922	55.948	0.0057	31.186	65.365	52.289	0.203	0.453	55.202
0.0139	7.969	17.080	53.344	0.406	0.926	56.136	0.0063	31.375	65.983	52.450	0.203	0.454	55.334
0.0153	8.022	17.278	53.571	0.406	0.930	56.330	0.0069	31.571	66.627	52.616	0.203	0.456	55.470

Tabel 16 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur Retak untuk Variasi Dimensi Penampang

b (mm)	h (mm)	Momen Retak, M_{cr} (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Retak, ϕ_{cr} (rad/km)		Selisih (%)
		<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
300	300	8,022	17,278	53,571	0,406	0,930	56,330
300	400	14,228	30,408	53,209	0,305	0,692	55,919
300	500	22,082	46,866	52,883	0,244	0,550	55,629
300	600	31,571	66,627	52,616	0,203	0,456	55,470

Tabel 17 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur Leleh untuk Variasi Mutu Beton

Dimensi 300x300 mm							Dimensi 300x600 mm						
Mutu Beton, f_c	Momen Leleh, M_y (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Leleh, ϕ_y (rad/km)		Selisih (%)	Mutu Beton, f_c	Momen Leleh, M_y (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Leleh, ϕ_y (rad/km)		Selisih (%)
(MPa)	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual		(MPa)	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
26	101,041	103,631	2,499	15,201	13,899	9,368	26	236,653	237,793	0,479	5,710	5,365	6,427
28	101,896	103,849	1,880	15,161	13,775	10,065	28	237,671	238,179	0,213	5,696	5,332	6,821
32	102,382	104,237	1,779	13,722	13,559	1,206	32	239,466	238,862	0,253	5,670	5,275	7,490
34	103,384	104,411	0,983	13,696	13,464	1,725	34	240,290	239,168	0,469	5,660	5,250	7,816
36	103,923	104,574	0,622	13,672	13,376	2,211	36	239,592	239,453	0,058	5,136	5,226	1,729
40	104,811	104,871	0,057	13,501	13,220	2,129	40	241,341	239,972	0,571	5,120	5,184	1,243

Tabel 18 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur Leleh untuk Variasi Mutu Baja Tulangan Longitudinal

Dimensi 300x300 mm							Dimensi 300x600 mm						
Mutu Baja, f_y	Momen Leleh, M_y (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Leleh, ϕ_y (rad/km)		Selisih (%)	Mutu Baja, f_y	Momen Leleh, M_y (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Leleh, ϕ_y (rad/km)		Selisih (%)
(MPa)	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual		(MPa)	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
300	73,618	74,178	0,755	10,356	9,839	5,255	300	170,346	170,128	0,128	3,890	3,809	2,133
320	78,496	79,123	0,792	11,391	10,495	8,538	320	181,700	181,470	0,127	4,279	4,063	5,324
350	85,621	86,541	1,063	12,530	11,479	9,158	350	198,563	198,482	0,041	4,707	4,444	5,929
370	90,007	91,486	1,617	12,530	12,135	3,257	370	208,842	209,824	0,468	4,707	4,697	0,203
400	97,052	98,904	1,872	13,783	13,119	5,064	400	226,066	226,837	0,340	5,178	5,078	1,962
420	101,896	103,849	1,880	15,161	13,775	10,065	420	237,671	238,179	0,213	5,696	5,332	6,821

Tabel 19 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur Leleh untuk Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

Dimensi 300x300 mm							Dimensi 300x600 mm						
Rasio Tulangan, ρ	Momen Leleh, M_y (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Leleh, ϕ_y (rad/km)		Selisih (%)	Rasio Tulangan, ρ	Momen Leleh, M_y (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Leleh, ϕ_y (rad/km)		Selisih (%)
	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual			<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
0,0090	63,871	64,369	0,774	12,530	12,194	2,752	0,0041	146,032	145,828	0,140	5,178	4,922	5,210
0,0101	71,164	71,614	0,629	13,783	12,495	10,306	0,0046	162,689	162,657	0,020	5,178	5,001	3,537
0,0113	78,392	79,192	1,010	13,783	12,804	7,649	0,0052	180,104	180,317	0,118	5,178	5,082	1,890
0,0126	85,848	87,094	1,430	13,783	13,119	5,057	0,0057	197,933	198,799	0,435	5,178	5,164	0,270
0,0139	92,736	95,315	2,706	13,783	13,443	2,529	0,0063	217,988	218,089	0,046	5,696	5,248	8,547
0,0153	101,896	103,849	1,880	15,161	13,775	10,065	0,0069	237,671	238,179	0,213	5,696	5,332	6,821

Tabel 20 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur Leleh untuk Variasi Dimensi Penampang

b (mm)	h (mm)	Momen Leleh, M_y (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur Leleh, ϕ_y (rad/km)		Selisih (%)
		<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
300	300	97,052	98,904	1,872	13,783	13,119	5,064
300	400	140,109	141,156	0,741	9,398	8,683	8,233
300	500	183,114	183,846	0,398	6,835	6,429	6,314
300	600	226,066	226,837	0,340	5,178	5,078	1,962

Tabel 21 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur *Ultimate* untuk Variasi Mutu Beton

Dimensi 300x300 mm							Dimensi 300x600 mm						
Mutu Beton, f_c	Momen <i>Ultimate</i> , M_u (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur <i>Ultimate</i> , ϕ_u (rad/km)		Selisih (%)	Mutu Beton, f_c	Momen <i>Ultimate</i> , M_u (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur <i>Ultimate</i> , ϕ_u (rad/km)		Selisih (%)
(MPa)	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual		(MPa)	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
26	103,102	101,962	1,118	26,930	23,532	14,440	26	246,781	245,652	0,460	26,239	23,532	11,504
28	104,206	103,198	0,977	29,545	25,342	16,585	28	247,951	246,888	0,431	28,788	25,342	13,598
32	106,071	105,206	0,822	32,356	27,989	15,603	32	249,768	248,896	0,350	31,527	27,989	12,642
34	106,820	106,033	0,742	32,295	29,221	10,520	34	250,517	249,723	0,318	34,613	29,221	18,453
36	107,507	106,768	0,692	35,463	30,392	16,685	36	251,176	250,458	0,287	34,553	30,392	13,690
40	108,670	108,017	0,604	38,519	32,552	18,330	40	252,359	251,707	0,259	37,893	32,552	16,407

Tabel 22 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur *Ultimate* untuk Variasi Mutu Baja Tulangan Longitudinal

Dimensi 300x300 mm							Dimensi 300x600 mm						
Mutu Baja, f_y	Momen <i>Ultimate</i> , M_u (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur <i>Ultimate</i> , ϕ_u (rad/km)		Selisih (%)	Mutu Baja, f_y	Momen <i>Ultimate</i> , M_u (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur <i>Ultimate</i> , ϕ_u (rad/km)		Selisih (%)
(MPa)	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual		(MPa)	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
300	77,511	76,991	0,675	39,325	35,479	10,841	300	180,142	179,627	0,287	42,148	35,479	18,798
320	82,133	81,541	0,726	35,750	33,261	7,482	320	191,575	191,019	0,291	38,317	33,261	15,200
350	88,935	88,229	0,800	32,500	30,410	6,871	350	208,710	207,971	0,355	34,258	30,410	12,652
370	93,394	92,597	0,861	32,500	28,767	12,978	370	219,982	219,181	0,365	31,667	28,767	10,082
400	99,952	99,012	0,949	29,545	26,609	11,033	400	236,784	235,860	0,392	28,788	26,609	8,188
420	104,206	103,198	0,977	29,545	25,342	16,585	420	247,951	246,888	0,431	28,788	25,342	13,598

Tabel 23 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur *Ultimate* untuk Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

Dimensi 300x300 mm							Dimensi 300x600 mm						
Rasio Tulangan, ρ	Momen <i>Ultimate</i> , M_u (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur <i>Ultimate</i> , φ_u (rad/km)		Selisih (%)	Rasio Tulangan, ρ	Momen <i>Ultimate</i> , M_u (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur <i>Ultimate</i> , φ_u (rad/km)		Selisih (%)
	<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual			<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
0,0090	66,567	66,200	0,555	47,583	42,441	12,115	0,0041	152,362	151,998	0,239	46,363	42,441	9,240
0,0101	73,729	73,279	0,614	43,258	37,857	14,268	0,0046	169,930	169,468	0,272	42,148	37,857	11,336
0,0113	81,116	80,553	0,699	39,325	33,977	15,742	0,0052	188,254	187,727	0,281	34,833	33,977	2,521
0,0126	88,678	87,987	0,785	35,750	30,664	16,587	0,0057	207,491	206,740	0,363	34,833	30,664	13,596
0,0139	96,385	95,548	0,876	29,545	27,813	6,227	0,0063	227,331	226,472	0,379	31,667	27,813	13,857
0,0153	104,206	103,198	0,977	29,545	25,342	16,585	0,0069	247,951	246,888	0,431	28,788	25,342	13,598

Tabel 24 Persentase Selisih Nilai Momen dan Kurvatur *Ultimate* untuk Variasi Dimensi Penampang

b (mm)	h (mm)	Momen <i>Ultimate</i> , M_u (kNm)		Selisih (%)	Kurvatur <i>Ultimate</i> , ϕ_u (rad/km)		Selisih (%)
		<i>Response2000</i>	Manual		<i>Response2000</i>	Manual	
300	300	99,952	99,012	0.949	29.545	26.609	11,033
300	400	145,576	144,628	0.655	29.494	26.609	10,842
300	500	190,984	190,244	0.389	31.405	26.609	18,023
300	600	236,784	235,860	0.392	28.788	26.609	8,188

Tabel 25 Persentase Selisih Nilai Daktilitas Kurvatur untuk Variasi Mutu Beton

Dimensi 300×300 mm				Dimensi 300×600 mm			
Mutu Beton, f_c' (MPa)	Daktilitas Kurvatur, μ_φ		Selisih (%)	Mutu Beton, f_c' (MPa)	Daktilitas Kurvatur, μ_φ		Selisih (%)
	<i>Response2000</i>	Manual			<i>Response2000</i>	Manual	
26	1,772	1,693	4,638	26	4,595	4,386	4,771
28	1,949	1,840	5,924	28	5,054	4,753	6,344
32	2,358	2,064	14,226	32	5,560	5,306	4,793
34	2,358	2,170	8,646	34	6,115	5,566	9,866
36	2,594	2,272	14,161	36	6,728	5,815	15,691
40	2,853	2,462	15,863	40	7,401	6,279	17,872

Tabel 26 Persentase Selisih Nilai Daktilitas Kurvatur untuk Variasi Mutu Baja Tulangan Longitudinal

Dimensi 300x300 mm				Dimensi 300x600 mm			
Mutu Baja, f_y (MPa)	Daktilitas Kurvatur, μ_ϕ		Selisih (%)	Mutu Baja, f_y (MPa)	Daktilitas Kurvatur, μ_ϕ		Selisih (%)
	<i>Response2000</i>	Manual			<i>Response2000</i>	Manual	
300	3,797	3,606	5,307	300	10,835	9,315	16,317
320	3,138	3,169	0,973	320	8,955	8,187	9,376
350	2,594	2,649	2,095	350	7,278	6,844	6,347
370	2,594	2,371	9,414	370	6,728	6,124	9,860
400	2,144	2,028	5,681	400	5,560	5,240	6,106
420	1,949	1,840	5,924	420	5,054	4,753	6,344

Tabel 27 Persentase Selisih Nilai Daktilitas Kurvatur untuk Variasi Rasio Tulangan Longitudinal

Dimensi 300x300 mm				Dimensi 300x600 mm			
Rasio Tulangan, ρ	Daktilitas Kurvatur, μ_ϕ		Selisih (%)	Rasio Tulangan, ρ	Daktilitas Kurvatur, μ_ϕ		Selisih (%)
	<i>Response2000</i>	Manual			<i>Response2000</i>	Manual	
0,0090	3,798	3,480	9,112	0,0041	8,954	8,624	3,831
0,0101	3,139	3,030	3,592	0,0046	8,140	7,570	7,533
0,0113	2,853	2,654	7,517	0,0052	6,727	6,686	0,619
0,0126	2,594	2,337	10,974	0,0057	6,727	5,938	13,291
0,0139	2,144	2,069	3,607	0,0063	5,560	5,300	4,892
0,0153	1,949	1,840	5,924	0,0069	5,054	4,753	6,344

Tabel 28 Persentase Selisih Nilai Daktilitas Kurvatur untuk Variasi Dimensi Penampang

b (mm)	h (mm)	Daktilitas Kurvatur, μ_ϕ		Selisih (%)
		<i>Response2000</i>	Manual	
300	300	2,144	2,028	5,681
300	400	3,138	3,064	2,410
300	500	4,595	4,139	11,014
300	600	5,560	5,240	6,106

Persentase selisih nilai momen retak berada dalam *range* 51-56% dan untuk nilai kurvatur retak berada dalam *range* 53-65%. Persentase selisih untuk nilai momen leleh

berada dalam *range* 0-3% dan untuk nilai kurvatur leleh berada dalam *range* 0-11%. Persentase selisih untuk nilai momen *ultimate* berada dalam *range* 0-2% dan

untuk nilai kurvatur *ultimate* berada dalam *range* 0-19%. Persentase selisih nilai daktilitas kurvatur menunjukkan selisih yang terbilang kecil, yaitu berada dalam *range* 0-18%.

D. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Hasil analisis *Response2000* memberikan kesimpulan sebagai berikut.
 - a. Peningkatan mutu beton menyebabkan meningkatnya kapasitas M_{cr} , M_y dan M_u . Sementara untuk nilai ϕ_{cr} dan ϕ_y mengalami penurunan, namun pada ϕ_u mengalami peningkatan. Secara mekanik, semakin meningkat mutu beton, maka semakin meningkat daktilitas kurvatur.
 - b. Peningkatan mutu baja tulangan longitudinal tidak menyebabkan perubahan pada M_{cr} , namun di sisi lain menyebabkan meningkatnya M_y dan M_u . Untuk nilai ϕ_{cr} tidak mengalami perubahan, namun ϕ_y mengalami peningkatan dan pada ϕ_u mengalami penurunan. Secara mekanik, semakin meningkat mutu baja tulangan maka semakin menurun daktilitas kurvatur.
 - c. Peningkatan diameter tulangan, menyebabkan meningkatnya M_{cr} , M_y , dan M_u . Sedangkan untuk nilai kurvatur, dengan peningkatan diameter tulangan tidak menyebabkan perubahan pada nilai ϕ_{cr} , namun di sisi lain menyebabkan nilai ϕ_y mengalami peningkatan dan pada ϕ_u mengalami penurunan. Secara mekanik, semakin meningkat diameter tulangan maka semakin menurun daktilitas kurvatur.
 - d. Peningkatan tinggi efektif penampang akibat peningkatan dimensi penampang, menyebabkan meningkatnya M_{cr} , M_y , dan M_u .

Sedangkan untuk nilai kurvatur, dengan peningkatan tinggi efektif penampang menyebabkan penurunan pada nilai ϕ_{cr} dan ϕ_y , sementara pada ϕ_u mengalami memiliki nilai yang hampir sama. Secara mekanik, semakin meningkat tinggi efektif penampang, maka semakin meningkat daktilitas kurvatur.

2. Hasil verifikasi dengan perhitungan secara manual memberikan kesimpulan bahwa verifikasi hasil analisis yang dilakukan, menunjukkan bahwa hasil analisis *Response2000* telah mendekati nilai hasil analisis manual. Untuk perhitungan momen dan kurvatur leleh, momen dan kurvatur *ultimate*, dan daktilitas kurvatur diperoleh selisih rata-rata perbedaan hasil analisis adalah 15,361%. Namun terdapat selisih yang cukup besar untuk perhitungan momen dan kurvatur retak yang berkisar antara 51% hingga 65%, hal ini dikarenakan pada *software Response2000* tidak menggunakan persamaan untuk modulus retak beton, tetapi lebih mengarah ke tegangan geser sesuai standar ACI.

E. SARAN

Penggunaan *Response2000* sebagai alat bantu untuk menghitung nilai daktilitas kurvatur pada balok beton bertulang hendaknya dapat dipergunakan secara cermat. Penggunaan kurva tegangan-regangan untuk beton maupun tulangan harus diperhatikan untuk mendapatkan hasil yang sesuai. Karena pengguna dapat dengan bebas meng-*input* kurva tegangan-regangan sesuai dengan keperluan analisis. Selain untuk menghitung nilai daktilitas kurvatur pada balok beton bertulang, *Response2000* juga dapat digunakan untuk menganalisis tinjauan lainnya dan berbagai model struktur dapat dibuat dengan sangat bervariasi, termasuk untuk keperluan analisis beton prategang yang dapat dikaji

dalam penelitian selanjutnya, karena sangat banyak *output* yang dihasilkan dari *software* ini.

F. DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee. (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary (ACI 318R-11). American Concrete Institute.
- Amir, F. (2012). Analisis Perbandingan Pengujian Lentur Balok Tampang Persegi Secara Eksperimental Di Laboratorium dengan Program Response 2000. *MEKTEK*, 12(3).
- Armeyn, A. (2013). Analisa dan Kajian Hubungan Momen-Kurvatur pada Balok Beton Bertulang. *Jurnal Momentum ISSN: 1693-752X*, 12(1).
- Badan Standarisasi Nasional. (2013). SNI 2847-2013: Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung.
- Bentz, E. C. (2000). Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members (Doctoral Dissertation, University of Toronto).
- Chairunnisa, N. (2011). Analisis Teoritis Layer Method dan Eksperimental Perkuatan Balok Beton Bertulang Menggunakan Tulangan Longitudinal Dengan Selimut Mortar. *Jurnal Infoteknik*, 12(1), 78-87.
- Chakravarthy, K. N. (2014). Effect Of Confinement on Curvature Ductility of Reinforced Concrete Beams (Doctoral Dissertation).
- Dita, G. (2010). Analisis dan Eksperimental Perhitungan Daktilitas Balok Beton Bertulang. Skripsi Sarjana, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha, Bandung.
- Edison, A. K. (2013). Pengaruh Sengkang Mutu Tinggi Terhadap Daktilitas Kurvatur Penampang Beton Bertulang. *Jurnal Teknik Sipil USU*, 2(1).
- Karolina, R. (2008). Analisa Dan Kajian Eksperimental Hubungan Momen-Kurvatur Pada Balok Beton Bertulang. Tesis Magister, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Nur, O. F. (2009). Analisa Pengaruh Penambahan Tulangan Tekan Terhadap Daktilitas Kurvatur Balok Beton Bertulang. *Jurnal Rekayasa Sipil ISSN: 1858-2133*, 5(1).
- Park, R., & Paulay, T. (1975). Reinforced Concrete Structures. John Wiley & Sons.
- Olivia, M., & Mandal, P. (2005). Curvature Ductility of Reinforced Concrete Beam. *Journal of Civil Engineering*, 6(1).
- Ritinov, M. N., & Assidiqy, M. F. (2008). Kajian Besaran Reduksi Momen Inersia pada Elemen-Elemen Struktur Beton Bertulang. Skripsi Sarjana, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung.